



## Modélisations numériques des pertes en régime variable dans des tubes supraconducteurs

Guillaume Escamez, Arnaud Badel, Arnaud Allais, Pascal Tixador, Brahim  
Ramdane, Gérard Meunier, Christian Eric Bruzek

### ► To cite this version:

Guillaume Escamez, Arnaud Badel, Arnaud Allais, Pascal Tixador, Brahim Ramdane, et al.. Mod-  
élisations numériques des pertes en régime variable dans des tubes supraconducteurs. Symposium de  
Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065368

**HAL Id: hal-01065368**

**<https://hal.science/hal-01065368>**

Submitted on 18 Sep 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Modélisation numérique des pertes en régime variable dans des tubes supraconducteurs

Guillaume Escamez<sup>1,2</sup>, Arnaud Badel<sup>2</sup>, Pascal Tixador<sup>2</sup>, Brahim Ramdane<sup>2</sup>, Gérard Meunier<sup>2</sup>, Arnaud Allais<sup>1</sup>, Christian-Éric Bruzek<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Nexans Research Center, 170 Avenue Jean Jaurès, F-69353 Lyon Cedex-07, France

<sup>2</sup>Univ de Grenoble Alpes, G2Elab/Ins NEEL, F-38402 Grenoble, France.  
CNRS, G2Elab/Ins NEEL, F-38402 Grenoble, France.

<sup>3</sup>Nexans, 4-10 Rue Mozart, Le Christophe 2, F-92587 Clichy Cedex, France.  
*guillaume.escamez@nexans.com*

**RESUME** -Les pertes AC dans les câbles supraconducteurs générées par un environnement variable dans le temps impactent la cryogénie et donc la faisabilité industrielle des dispositifs supraconducteurs. Nexans est aujourd'hui sur le point de réaliser des fils cylindriques supraconducteurs pour des câbles de forte puissance. Aucune étude numérique n'a pour l'instant porté sur le calcul des pertes AC dans un ou plusieurs tubes. Cet article présente les étapes de création d'un modèle de calcul de pertes à l'aide d'un logiciel d'éléments finis pour une nouvelle géométrie : tube ou cylindre supraconducteur. La non-linéarité des formules E-J ainsi que les problèmes de convergence ont été traités par l'implémentation d'une formulation en H pour la résolution numérique. Les résultats ont été comparés aux formules analytiques. Dans le but de vérifier l'exactitude du modèle, une série de mesures expérimentales a aussi été réalisée sur un ruban supraconducteur industriel.

**Mots-clés**—supraconductivité, HTS, pertes AC, modélisation numérique.

## 1. INTRODUCTION

Les supraconducteurs à haute température critique permettent aujourd'hui la réalisation de nombreuses applications industrielles dans le domaine des fortes puissances. L'utilisation de l'azote liquide comme moyen de refroidissement permet de baisser le coût de la cryogénie par rapport à l'hélium liquide. Depuis quelques années, la tendance des grands fabricants est d'augmenter les courants critiques pour le conducteur YBCO, mais sans altérer sa géométrie fondamentale (ruban). Cette augmentation permet le transport d'une puissance plus importante sous une même tension dans les dispositifs supraconducteurs. Plusieurs projets visent aujourd'hui l'utilisation de ces conducteurs: câbles de transport AC ou DC, limiteurs de courant de défaut, moteurs, aimants fort champ. Pour une partie de ces applications, les supraconducteurs sont bien appropriés car ils ne présentent pas de pertes, en particulier dans un environnement constant dans le temps. Toutefois lorsque le supraconducteur est soumis à un contenu variable dans le temps (courant ou champ extérieur), celui-ci dissipe des pertes, appelées pertes AC, en dessous de la surface critique (le conducteur étant dans son état supra). Ces pertes impactent donc le dimensionnement du dispositif

cryogénique. Les pertes AC dans les rubans supraconducteurs ont fait l'objet d'un certain nombre d'études visant à évaluer l'intérêt de cette technologie dans la création de câbles de puissance.

Nexans développe à ce jour des fils cylindriques supraconducteurs [2] faits d'un ruban supraconducteur roulé sur lui-même et soudé. Cette géométrie est nettement plus appropriée aux applications que la géométrie de ruban fin classique. Pour l'instant, seuls des câbles faits de rubans enroulés autour d'une âme ont été réalisés et testés[1]. Les fils cylindriques supraconducteurs permettent d'avoir un câble plus compact (meilleur arrangement des tubes) et une densité globale de courant nettement améliorée (multiplication par un facteur 5). Les projets de câbles supraconducteurs faits de rubans et de tubes sont présentés sur la Figure 1 :



Figure 1: Câbles supraconducteurs faits de rubans (a) et de fils cylindriques (b). Les dessins sont à l'échelle

Il convient toutefois d'analyser les pertes AC dans les tubes supraconducteurs soumis à un courant ou un champ extérieur variable dans le temps. Les études des pertes AC avec cette géométrie cylindrique sont très rares, en particulier avec courant de transport et champ extérieur, sans même considérer le torsadage des tubes dans le câble. Cet article présente la première étape de la création d'un modèle d'estimation des pertes AC pour un câble de forte puissance fait de fils cylindriques supraconducteurs. Une présentation générale des pertes AC et leur implémentation dans un logiciel d'éléments finis est réalisée dans la partie 2. Les différents résultats obtenus pour un fil cylindrique dans un environne-

ment variable sont détaillés dans la partie 3. Enfin, pour estimer l'exactitude du modèle, diverses expériences ont été menées sur un ruban supraconducteur commercial et sont présentées dans la partie 4.

## 2. MODÈLE DEVELOPPÉ POUR LE CALCUL DES PERTES

Les supraconducteurs ne présentent pas de résistivité mesurable sous des conditions de température et de courant de transport (on parle de température critique et de courant critique). Cette absence de résistivité n'implique pas forcément une absence de pertes. Lorsqu'un supraconducteur est soumis à un environnement purement constant dans le temps, il ne dissipe pas de pertes. L'application d'un courant ou un champ extérieur variable dans le temps (par exemple un courant sinusoïdal) crée une variation temporelle d'induction magnétique à l'intérieur du supraconducteur. Cette variation d'induction engendre la création d'un champ électrique en accord avec l'équation de Maxwell :

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

Où  $E$  est le champ électrique et  $B$  l'induction magnétique.

L'existence d'un champ électrique variable implique la création de courants induits et donc de pertes à l'intérieur du supraconducteur (2)

$$P_{AC} = \iiint \vec{J} \cdot \vec{E} dv \quad (2)$$

Où  $dv$  est le volume de supraconducteur et  $P_{AC}$  les pertes AC dans le supraconducteur.

Ce calcul intégral impose de connaître les distributions de densité de courant et de champ électrique à l'intérieur du conducteur. Le supraconducteur piégeant aussi les densités de courant dans le conducteur (pas d'amortissement lié à l'effet Joule), il convient de connaître l'histoire du phénomène pour pouvoir évaluer ces pertes. Pour ces deux raisons, un modèle a été développé à l'aide d'un logiciel d'éléments finis commercial (COMSOL®). Le modèle de résolution de ce problème magnéto-transitoire a été inspiré de plusieurs travaux réalisés sur des rubans ou sur des supraconducteurs à basse température critique [3], [4]. Le supraconducteur est considéré comme non magnétique. L'équation de résolution qui régit le modèle est la suivante (3)

$$\nabla \times (\rho(J) \cdot \nabla \times H) = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \text{ avec } B = \mu_0 H \quad (3)$$

Où  $H$  est le champ magnétique (en A/m),  $J$  la densité de courant (A/mm<sup>2</sup>) et  $\rho$  la résistivité des matériaux (Ω.m).

Cette formulation dite 'en H' permet de bons résultats de convergence et de stabilité pour le calcul de problèmes

fortement non linéaire, particulièrement adapté dans le cas des supraconducteurs. La loi en E-J présenté ci-après est en effet particulièrement non linéaire. Les simulations ont été réalisées en 2D suivant un plan xOy avec un courant imposé selon Oz. Le problème se réduit donc à évaluer le champ magnétique  $H$  porté par Ox et Oy et le champ électrique dont la seule composante est portée par Oz. Le calcul des pertes a été réalisé avec des courants et des champs magnétiques extérieurs variables dans le temps, mais périodiques. Les pertes moyennes sur une période (pertes actives)  $P_{AC}$  (W/m) pour le supraconducteur deviennent :

$$P_{AC} = \frac{1}{T} \cdot \int (\iint J_z \cdot E_z dS) dt \quad (4)$$

Avec  $T$  la période du phénomène,  $dS$  la surface du supraconducteur.  $J_z$  et  $E_z$  sont respectivement la densité de courant et le champ électrique dans le conducteur.

La résistivité non linéaire du supraconducteur est modélisée à l'aide de deux formulations : la première utilisant une loi développée notamment à l'Université de Genève [5] en (5) et la loi 'classique' en puissance en (6).

$$\rho(J) = \frac{E(|J|)}{|J|} = \begin{cases} \frac{E_c}{|J|} \left( \frac{|J|}{J_{ci}} - 1 \right)^{n_1} + \rho_0 & si |J| \geq J_{ci} \\ 0 & si |J| < J_{ci} \end{cases} \quad (5)$$

$$\rho(J) = \frac{E(|J|)}{|J|} = \frac{E_c}{J_c} \left( \frac{|J|}{J_c} \right)^{n-1} \quad (6)$$

Les paramètres utilisés pour les simulations sont  $J_c = 1.15 \cdot 10^4$  A/mm<sup>2</sup>,  $J_{ci} = 1.13 \cdot 10^4$  A/mm<sup>2</sup>,  $n_1 = 2$ ,  $n = 30$ ,  $E_c = 1 \mu\text{V/m}$ . Les lois de comportements ainsi que le modèle de Bean sont représentées sur la Figure 2.

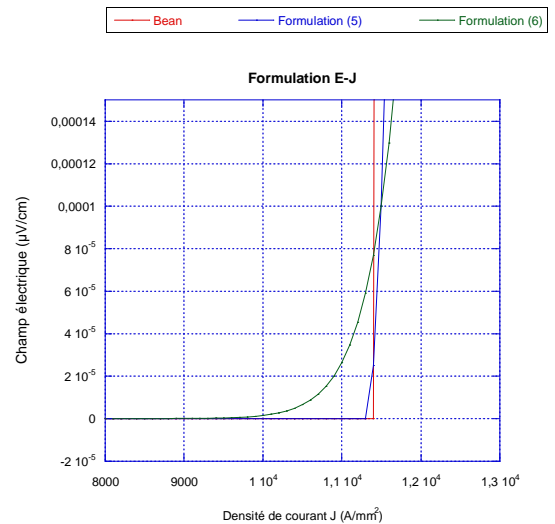


Figure 2: Formulation E-J. Paramètres de calculs ci-dessus

Ces deux lois expérimentales visent à décrire le comportement du supraconducteur sous le courant critique ( $I_c$ ) et au-dessus lors d'utilisations dissipatives. La loi en  $J^n$  (6) modélise la résistivité du supraconducteur en prenant en compte l'activation thermique des vortex lors des mesures de champ électrique avec des courants proches de  $I_c$  [6] mais considère que le supraconducteur dissipe, ce qui n'est pas toujours le cas. La loi alternative considère l'absence totale de champ électrique en dessous de  $J_{ci}$ . Par ailleurs, avec cette loi, expérimentalement, l'exposant  $n_1$  est pratiquement constant alors que  $n$  varie avec le courant et la température. Une grande partie des simulations suivantes sont basées sur la première loi de puissance, mais certains résultats seront présentés avec la loi en puissance classique pour comparer l'impact de ces différentes lois sur le calcul des pertes AC.

### 3. LES PERTES DANS UN FIL CYLINDRIQUE SUPRACONDUCTEUR

Nexans est en phase de développement de fils cylindriques composés de rubans de YBCO repliés sur eux-mêmes et soudés avec un courant critique proche de 130 A. Ces tubes possèdent un rayon intérieur de 0.9 mm et une couche de YBCO de 2  $\mu m$ . Les pertes AC dans un tube supraconducteur ont été résolues analytiquement en champ propre [7] (courant de transport sinusoïdal) et en champ extérieur [8] (champ magnétique extérieur sinusoïdal). Toutefois aucun calcul analytique n'a été fait concernant les pertes AC lorsque le tube est soumis à un champ magnétique et un courant de transport variable. Le modèle a d'abord été testé en champ propre et en champ extérieur puis dans un second temps avec une combinaison champ propre-champ extérieur.

#### 3.1. Pertes en champ propre

Les pertes en champ propre sont générées par un courant de transport variable dans le temps. Le courant de transport utilisé lors des simulations est sinusoïdal de fréquence  $f = 50$  Hz et d'amplitude  $I$  comprise entre 0 et 117 A (correspondant à un rapport  $I/I_c$  de 0,9). La formule analytique [9] des pertes en champ propre pour un cylindre est présentée ci-dessous :

$$P_{AC-analytique} = \frac{f \mu_0 I_c^2}{\pi} \left( \frac{\beta}{\alpha_R} - \frac{\beta^2}{2} + \frac{(1-\alpha_R \beta)}{\alpha_R^2} \cdot \ln(1 - \alpha_R \beta) \right) \quad (7)$$

$$\text{Avec} \quad \alpha_R = 1 - \frac{R_{in}^2}{R_e^2} \quad \text{and} \quad \beta = \frac{I}{I_c}$$

Où  $f$  est la fréquence (Hz),  $I_c$  le courant critique (130 A),  $I$  l'amplitude du courant,  $R_{in}$  le rayon intérieur du tube et  $R_e$  le rayon extérieur du tube (respectivement 0.9 mm et 0.902 mm).

La figure 3 présente les résultats de simulation ainsi que la formule analytique (7).

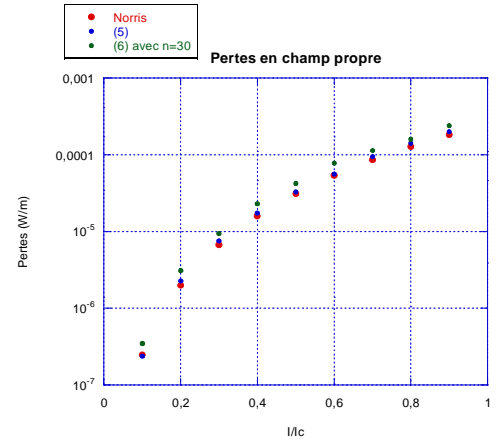


Figure 3 : Pertes en champ propre pour un tube supraconducteur

Les résultats des simulations sont proches (< 5 % pour la formulation (5) et des écarts jusqu'à 20 % pour la formulation (6)) de la formule analytique. Les écarts constatés sont liés à la formulation implémentée dans le logiciel utilisant une loi pour le supraconducteur suivant (5) ou (6). Au contraire, la formule analytique utilise le modèle de Bean [10], qui suppose qu'un champ électrique ne peut exister que pour la densité de courant critique (positive ou négative) qui ne peut être dépassée (Figure 2). Le modèle de Bean correspond à un  $n$  «infini». Cette hypothèse a permis le calcul analytique, mais ne décrit pas totalement le comportement du supraconducteur notamment proche de son courant critique. Les lois implémentées dans le logiciel donnent des résultats proches de la formulation analytique avec une meilleure précision pour la loi (5). Avec la loi E-J en  $J^n$  (6), les résultats deviennent logiquement très proches des expressions analytiques pour un  $n$  grand : l'erreur est inférieure à 1 % pour un  $n$  de 1000.

#### 3.2. Pertes en champ extérieur

La figure 4 présente les pertes calculées pour un tube supraconducteur soumis à un champ magnétique extérieur sinusoïdal de fréquence 50 Hz ainsi que la formule analytique utilisant le modèle Bean comme hypothèse fondamentale [8].

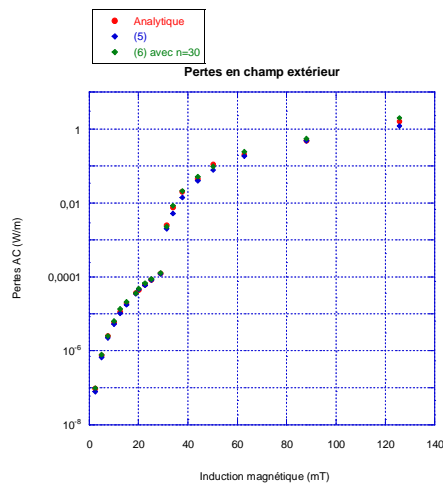


Figure 4 : Pertes en induction magnétique extérieure pour un tube supraconducteur

On observe une forte augmentation des pertes lorsque l'induction magnétique extérieure appliquée est supérieure à 30 mT, ceci correspondant à la pénétration complète du courant à l'intérieur de la couche supraconductrice, c'est à dire que les courants induits ne peuvent plus augmenter. Pour des inductions magnétiques inférieures à 30 mT le tube écran l'induction magnétique ; aucune induction magnétique n'est présente à l'intérieur du tube. Lorsque l'amplitude de l'induction appliquée est supérieure à l'induction de pénétration, l'induction magnétique pénètre l'intérieur du tube. La figure 3 présente les répartitions de densité de courant (rouge : densité de courant positive et bleu : densité de courant négative) ainsi que l'induction magnétique (flèches normalisées). L'épaisseur des tubes a été volontairement agrandie pour permettre une meilleure visibilité des répartitions de courant. Dans la figure 5a, le courant n'atteint pas le rayon intérieur, contrairement à la figure 5b.

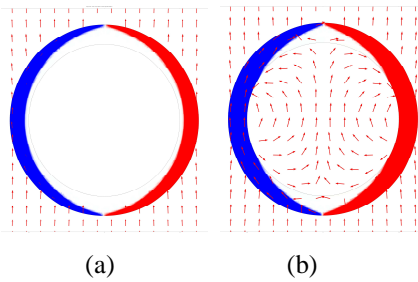


Figure 5 : Répartition de courant et induction magnétique pour un champ de 20 mT (a) et de 50 mT(b)

Les calculs des pertes en champ extérieur sont proches de la formule analytique (écart moyen pour la formulation (5) de 7 % et de 12 % pour la formulation (6)) On observe un bon accord entre les simulations numériques et les calculs analytiques. On note toujours une meilleure précision sur l'estimation des pertes avec la formulation (5) qu'avec la formulation (6) avec un n de 30 (valeur typique mesurée sur des rubans YBCO commerciaux). Au contraire, la formulation (6) est plus rapide à réaliser que la formulation (5)

(augmentation moyenne du temps de calcul de 30 %). En conclusion, les calculs de pertes AC en champ propre et extérieur sont proches des valeurs analytiques. Pour la suite des simulations numériques, la formulation (5) sera utilisée, les calculs précédents montrant que les résultats dépendent peu de la loi E-J utilisée.

### 3.3. Pertes couplées champ propre - champ extérieur

Pour simuler un câble supraconducteur fait de plusieurs tubes, l'étude des pertes AC sur un tube supraconducteur sous l'action d'un courant ainsi que d'un champ magnétique extérieur a été menée. Les résultats sont présentés sur la Figure 6 avec en abscisse l'induction magnétique extérieure et en ordonnée les pertes (calculés pour une fréquence de 50 Hz avec un courant de transport et un champ magnétique sinusoïdaux en phase). Les résultats sont donnés en fonction du ratio entre l'amplitude du courant de transport et le courant critique.

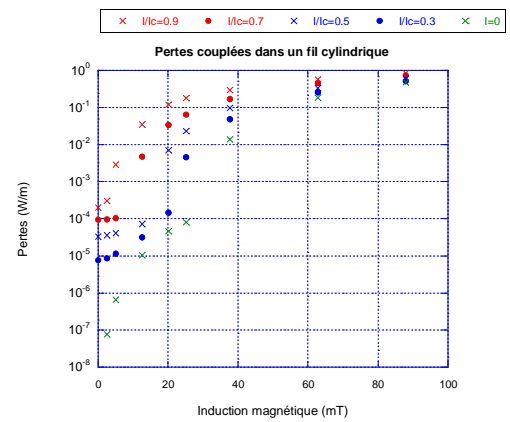


Figure 6 : Pertes couplées pour un tube supraconducteur

On observe que, pour une même amplitude de champ magnétique, les pertes augmentent avec le courant de transport. Le champ magnétique de pénétration est lui aussi réduit en fonction du courant de transport du tube. Pour une utilisation du tube supraconducteur dans les meilleures conditions, il convient de choisir un couple (I, B) tel que le tube ne soit pas pénétré ce qui correspond par exemple à une induction magnétique inférieure à environ 20 mT pour un I/Ic de 0,5. Il est possible de tracer l'induction magnétique de pénétration en fonction du courant de transport (Figure 7).



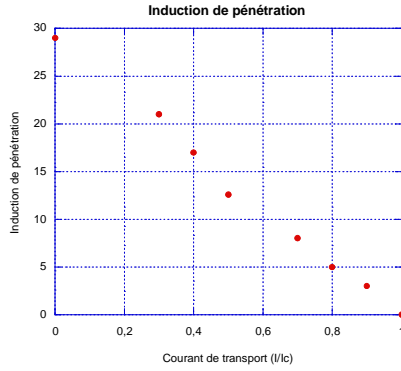


Figure 7. Induction de pénétration en fonction du courant de transport

L'induction de pénétration décroît linéairement depuis la valeur théorique de pénétration sans courant de transport

$$Bp\left(\frac{I}{I_c} = 0\right) = \mu_0 \cdot J_c \cdot e = 29 \text{ mT} \quad (8)$$

Pour une utilisation industrielle intéressante, il convient de réduire au maximum les pertes AC et donc d'éviter la pénétration dans les fils cylindriques. La Figure 4 montre le domaine d'existence du couple courant de transport champ magnétique variable à considérer (domaine sous les points). Ce modèle pose comme hypothèse un champ magnétique uniforme autour du conducteur ce qui n'est pas le cas pour un câble contenant un certain nombre de fils. Il convient donc de simuler des arrangements de fils cylindriques sous différentes géométries (fils collés ou espacés) pour limiter les effets de pénétration dans les fils liés aux champs magnétiques variables.

### 3.4. Un exemple: 6 fils cylindriques supraconducteurs

Une fois les simulations sur un tube supraconducteur réalisées, le modèle a été testé sur un arrangement de 6 fils cylindriques. Trois géométries ont été étudiées : six fils cylindriques supraconducteurs collés entre eux (Géométrie 1) et six fils supraconducteurs répartis uniformément sur le périmètre d'un cercle de rayon 3,6 mm (Géométrie 2). Une dernière géométrie a été simulée, trois fils cylindriques analogue à la géométrie 1 avec un fil supraconducteur sur 2 (Géométrie 3). La Figure 8 présente les géométries 1 et 3(a) le maillage autour des fils cylindriques (b). La couche d'YBCO est représentée en rouge et discrétisée, 10 éléments dans l'épaisseur (zone noire sur le dessin) et 360 sur le périmètre.

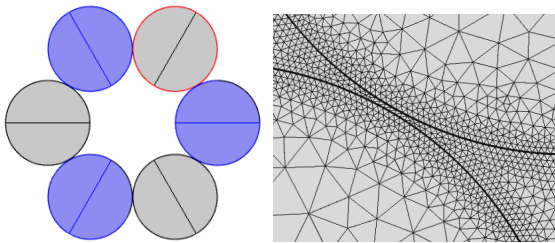


Figure 38: Géométrie 1 et 3 (en bleu) et maillage entre deux tubes

Les simulations ont duré entre 8 heures et plusieurs jours (Ordinateur de bureau, Processeur I7, 16 Go de RAM). Le nombre de degrés de liberté important (>100000) explique la durée des calculs. La Figure 9 présente les pertes en fonction de la marge de courant des fils cylindriques

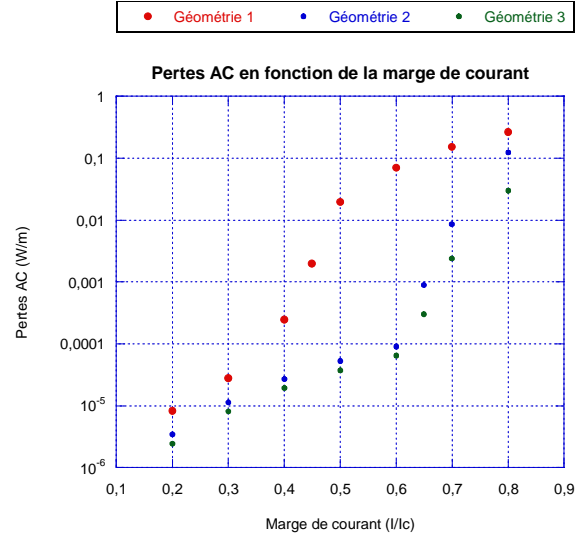


Figure 9: Pertes AC sur des arrangements de fils cylindriques

On observe que les pertes AC augmentent fortement pour de faibles valeurs de courant ( $I/I_c > 0,3$ ) pour la Géométrie 1. Cette augmentation importante des pertes résulte de la pénétration locale à l'intérieur des fils cylindriques. Les deux solutions envisagées pour réduire l'amplitude de l'induction magnétique provoquant la pénétration complète, étaient d'éloigner les tubes ou de n'en mettre qu'un sur deux (respectivement Géométrie 3 et 2). Ces deux solutions permettent d'augmenter nettement la marge de courant ( $I/I_c$  au début de la pénétration locale augmenté de 0,3) avant qu'il n'y ait des pénétrations locales dans les tubes.

En conclusion sur la partie modélisation, différentes simulations ont été réalisées sur un tube supraconducteur dans le but d'estimer les pertes AC lors de l'utilisation d'un courant ou d'un champ magnétique extérieur variable. Un dernier calcul présentant une géométrie de 6 fils cylindriques a été étudié. Cette étude a été menée et confrontée aux valeurs analytiques pour vérifier l'exactitude des résultats. Il apparaît de ces résultats que la formulation de l'Université de Genève (5) est plus proche des formules analytiques pour un temps de calcul un peu plus long.

## 4. MESURE SUR UN RUBAN SUPRACONDUCTEUR

Il n'a pas été possible de mesurer les pertes d'un fil cylindrique supraconducteur YBCO. Dans l'optique de mesurer des pertes pour vérifier l'exactitude du modèle, une manipulation expérimentale sur un ruban commercial YBCO de l'entreprise SuperPower® [11] a été réalisée. Le ruban est composé d'une couche de YBCO de 2  $\mu\text{m}$ , une largeur de 4 mm et un courant critique de 130 A. Les pertes mesurées sont des pertes en champ propre avec une source de courant alternative triangle ou sinus pouvant atteindre 100 A avec une fréquence jusqu'à 2 kHz. La manipulation a lieu dans l'azote liquide à 77 K. La mesure des pertes est faite de

manière électrique : deux prises de potentiel ont été placées sur le ruban à une distance suffisante des aménées de courant en cuivre (6 cm) et soudées avec de la laque d'argent de sorte à limiter les résistances de contact. Le signal des pertes à mesurer étant en phase, la partie inductive de la tension a été supprimée pour améliorer la précision. Les résultats ont été comparés au modèle numérique avec un courant critique de 125 A. La figure 10 présente les pertes mesurées sur le ruban ainsi que le modèle numérique pour un courant sinusoïdal.

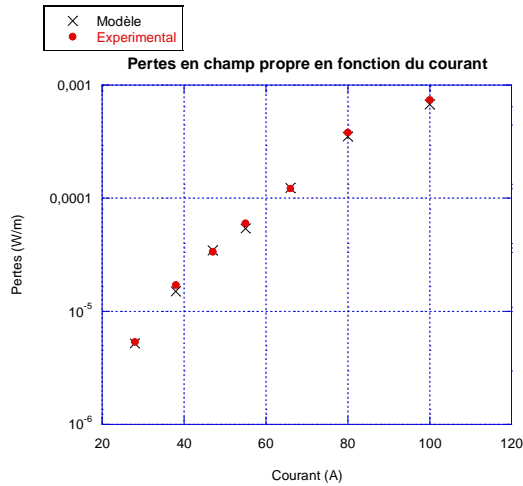


Figure 10 : Pertes expérimentales et numériques en fonction du courant sinusoïdale

La source de courant utilisé étant capable de générer des signaux sinusoïdaux et triangulaires. Une manipulation a été réalisée avec un sinus et un triangle d'amplitude 61 A et de fréquence variable. Les résultats sont présentés sur la Figure 11 avec E l'expérience et M le modèle numérique COMSOL.

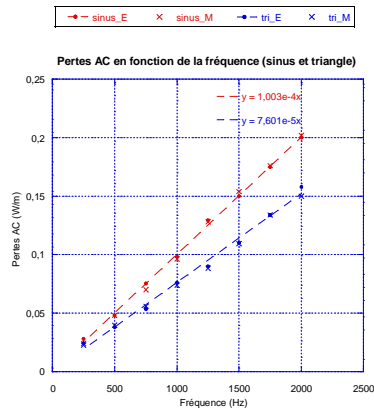


Figure 11: Pertes expérimentales sinus et triangle.

On observe que l'accord entre le modèle numérique et les manipulations expérimentales pour les deux figures est très bon (écart inférieur à 7 %, 5 % en moyenne). Les résultats de simulations présentés sur les Figure 10 et 11 ont été obtenus avec la formule (5). La formulation (6) donne des résultats plus éloignés (écart compris en 6 et 10 % pour une valeur de  $n$  de 30, valeur typique pour ces supraconducteurs). On observe une

différence entre les pertes générées avec un courant sinusoïdal et triangulaire. Cette expérience est en désaccord avec le modèle analytique qui ne considère que l'amplitude du courant et non sa forme. En revanche sous COMSOL, avec des conditions proches du modèle de Bean (loi en puissance avec un  $n$  de 5000), on retrouve que les pertes sont identiques pour un sinus et un triangle à amplitude égale. La différence entre sinusoïde et triangle est bien liée à la loi (5) ou (6) qui traduit plus fidèlement le comportement du supraconducteur.

## 5. CONCLUSION

Cet article présente les pertes d'un fil cylindrique supraconducteur estimées à l'aide d'un logiciel d'élément finis. Le modèle a aussi été confronté à une manipulation expérimentale et l'accord est bon ( $< 7\%$ ). La formulation de l'Université de Genève donne des résultats en moyenne plus proches des valeurs analytiques mesurées que la formulation classique (loi en puissance). En revanche, elle demande des temps de simulation un peu plus longs. La formulation en  $H$  développée dans le modèle est particulièrement adaptée pour ces calculs car elle fait intervenir la résistivité des matériaux (nulle pour des valeurs de densité de courant inférieur à  $J_{c0}$ ) et non pas leur conductivité. La formule (5) a donc été retenue pour la suite de nos calculs malgré un temps de calcul légèrement augmenté. Compte tenu des bons accords simulations numériques-analytiques, il est possible de conclure qu'en première approximation, les pertes simulées devraient être proches des pertes expérimentales pour un tube supraconducteur. La suite du travail consiste en la création et le dimensionnement d'un modèle avec plusieurs tubes supraconducteurs ainsi que le passage à la 3D et une phase expérimentale.

## 6. REFERENCES

- [1] J. Souc, F. Gomory, B. Klincok, L. Frolek, M. Vojený, A. Usoskin, and A. Rutt, "AC Loss Measurement of YBCO Cable Model," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, no. 2, pp. 1718–1721, 2007.
- [2] C. E. Bruzek, A. Allais, S. Morice, C.-F. Theune, S. Petit, M. Mikolajczyk, N. Dechoux, C. Jimenez, E. Sarigiannidou, L. Porcar, J. Soubeyroux, P. Odier, and T. Waeckerle, "New HTS 2G Round Wires," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, pp. 5800204–5800204, Jun. 2012.
- [3] V. M. R. Zermeno and F. Grilli, "3D modeling and simulation of 2G HTS stacks and coils," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 044025, no. 27, p. 7, 2014.
- [4] F. Grilli, E. Pardo, A. Stenvall, D. N. Nguyen, and W. Yuan, "Computation of Losses in HTS Under the Action of Varying Magnetic Fields and Currents," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 1, 2014.
- [5] J. Duron, F. Grilli, L. Antognazza, M. Decroux, S. Stavrev, B. Dutoit, and Ø. Fischer, "Finite-element modelling of superconductors in over-critical regime

- with temperature dependent resistivity,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 43, pp. 1076–1080, Jun. 2006.
- [6] S. Stavrev, “Modelling of High Temperature Supraconductors for AC Power Applications,” École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002.
- [7] W. T. Norris, “Calculations of hysteresis losses in hard super-conductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets,” *J. Appl. Phys.*, vol. 3, 1930.
- [8] Y. Mawatari, “Superconducting tubular wires in transverse magnetic fields,” *Phys. Rev. B*, vol. 83, no. 13, p. 134512, Apr. 2011.
- [9] W. T. Norris, “Calculation of hysteresis losses in hard super- conductors carrying ac : isolated conductors and edges of thin sheets,” *J. Appl. Phys.*, vol. 3, no. 1930, pp. 489–507, 1969.
- [10] C. P. Bean, “Magnetization of High-Field Superconductors,” in *Reviews of Modern Physics*, 1964, vol. 267, no. 1960.
- [11] “<http://www.superpower-inc.com/>.” .